

复杂边坡滑动面确定的联合搜索法

曹 平, 张 科, 汪亦显, 胡汉华

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 针对复杂边坡特点, 提出改进的滑动面搜索变量选取方式, 通过左、右出滑点和弧高控制滑动面位置, 搜索变量取值范围不再需要经验假定。使用分区间搜索策略, 以寻找最危险滑动面和潜在危险滑动面, 同时也将搜索区域分割, 增大算法搜索到全局最优值的可能性。利用混沌优化算法和复合形法联合搜索算法确定复杂边坡的最小安全系数和滑动面, 充分利用混沌搜索和复合形法各自的优点, 有效地避免陷入局部最小值, 并克服混沌优化耗时较长的不足。通过对复杂边坡实例的计算, 结果证明, 采用改进搜索变量的基本复合形法寻优成功率比传统搜索变量高出 40%~60%。联合搜索法的最小安全系数集中于 1.70~1.72, 全局搜索能力远远优于基本复合形法。多级边坡工程算例的分析表明, 该边坡的 4 条潜在滑动面, 其安全系数与最小安全系数相差不超过 7.6%, 最小仅相差 3.6%, 但相应的滑动面位置与最危险滑动面完全不同。

关键词: 边坡工程; 简化 Bishop 法; 搜索变量; 分区间搜索策略; 混沌优化; 复合形法

中图分类号: P 624

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)04 - 0814 - 08

MIXED SEARCH ALGORITHM OF CRITICAL SLIP SURFACE OF COMPLEX SLOPE

CAO Ping, ZHANG Ke, WANG Yixian, HU Hanhua

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: In view of the characteristic of complex slope, an improved method of selecting search variable is presented. The positions of two exiting points and arc height of the slip surface are taken as search variables, and assumptions aren't required. Divided-interval search has been introduced so as to locate the most dangerous slip surfaces and the next critical slip surfaces, of which the obvious advantage is employed to divide the search region, increasing the possibility of finding the global optimum. Chaos optimization method and improved complex method are combined to search the minimum safety factor and critical slip surface. Mixed search algorithm combines the merits of two algorithms, which can effectively avoid local minimum, and overcome time-consuming disadvantage of chaos optimization method. Mixed search algorithm is applied to searching the minimum safety factor of a complex slope; and the result shows that the rate of successful computation of basic complex method with improved search variable is 40% - 60% higher than that with the current search variable. The minimum safety factor obtained by mixed search algorithm is ranging from 1.70 to 1.72. So mixed search algorithm is much more likely to find the global optimum of complex slope. And analyses of multi-step slope engineering example show that there are four next critical slip surfaces with small differences in safety factor; the relative difference is 7.6% in maximum, and 3.6% in minimum, but large differences in the location of critical slip surface.

Key words: slope engineering; simplified Bishop method; search variable; divided-interval search; chaotic optimization; complex method

收稿日期: 2009 - 10 - 09; **修回日期:** 2009 - 12 - 15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10972238); 中南大学米塔尔学生创新项目(09MX14)

作者简介: 曹 平(1959 -), 男, 1990 年于中南工业大学获博士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土工程理论、试验和数值计算方面的研究工作。E-mail: pcao_csu@tom.com

1 引 言

边坡稳定性问题是岩土工程研究领域的重要问题之一。目前, 在边坡实际工程计算及现行边坡规范中通常都是以极限平衡理论为基础, 条分法分析仍是工程界和规范方面的主流, 并有一套完整的经验指标和工程指标, 而圆弧滑动法是条分法中应用最广泛的。因此, 寻找边坡最危险圆弧滑动面有比较重要的现实意义。

对于匀质简单边坡采用传统方法如二分法、单纯形法和牛顿法等均可以快速搜索到临界滑动面。但在工程实际中为满足稳定性要求, 常采用逐级放坡, 其形状呈阶梯状, 而边坡岩土体也一般分为多层, 属于多极值复杂问题, 应用传统方法很容易陷入局部极小值。近年来, 在利用遗传算法^[1, 2]、模拟退火算法^[3, 4]、粒子群优化算法^[5]等智能优化算法研究边坡稳定性方面取得了较好的效果。但实际应用中遗传算法局部寻优能力不足, 容易产生早熟现象; 模拟退火算法对整个搜索空间状况了解不多, 全局搜索能力较差; 粒子群算法进行计算时存在惯性因子敏感、计算量大等缺点。

现有文献中圆弧滑动法搜索变量的选取方式主要有 2 种: (1) 滑弧的圆心坐标(X_C, Y_C)与滑弧半径 R ; (2) 滑弧与边坡坡面左右交点的 2 个横坐标(X_A, X_B)与滑弧圆心纵坐标 Y_C ^[6]。第一种方式参数范围的确定主要靠经验, 不同的搜索区域可能导致安全系数的变化, 当坡面形状不规则时, 滑动面与坡面交点的求解将会很复杂。第二种方式较第一种有所改进, 滑弧与边坡坡面的左右交点求解比较容易, 但是滑弧圆心纵坐标 Y_C 搜索范围的确定仍需靠经验。

混沌优化算法是一种新兴的全局优化算法, 有着独到的优越性^[7~9], 研究表明, 利用混沌搜索的效果明显优于模拟退火法和遗传算法等优化方法^[7], 但混沌优化算法的局部搜索能力不强, 搜索时间较长。复合形法是求解非线性约束优化问题的一种直接解法, 对目标函数无特殊要求, 也不必进行求导运算, 在工程上应用较为广泛, 但容易陷入局部极小值^[10, 11]。

本文提出一种新的搜索变量选取方式, 考虑滑动面合理性, 并进行严格的数学推导。变量取值范围不需要经验假设, 不会因为取值范围的人为假定而遗漏掉可能的危险滑动面。在此基础上采用分区间搜索策略, 混沌优化算法和复合形法联合搜索复

杂边坡的危险滑动面, 并且可以自动完成多滑动面的搜寻, 充分利用混沌搜索全局优化和复合形法局部收敛速度快的特点, 有效地避免陷入局部最小值, 并克服混沌搜索耗时较长的不足。

2 复杂边坡简化 Bishop 法计算方法

简化 Bishop 法简单, 并具有较高的精度, 计算结果与严格的条分法十分接近^[12], 在工程实际中得到广泛的应用, 因此本文采用简化 Bishop 法计算安全系数。简化 Bishop 法^[13]计算复杂边坡安全系数的模型如图 1 所示, 其公式为

$$F_s = \frac{\sum m_{ai} [c'_i b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi'_i]}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad (1a)$$

其中,

$$m_{ai} = \frac{1}{\cos \alpha_i + \frac{\tan \phi'_i \sin \alpha_i}{F_s}} \quad (1b)$$

$$W_i = \gamma_1 b_i h_{1i} + \gamma_2 b_i h_{2i} + \dots + \gamma_j b_i h_{ji} + \dots + \gamma_k b_i h_{ki}$$

式中: F_s 为安全系数; c'_i, ϕ'_i 均为滑动面所在土层的有效抗剪强度指标; u_i 为作用在土条 i 滑动面上的孔隙水压力; b_i 为土条宽度; α_i 为土条底部坡角; W_i 为土条 i 的自重力, k 为滑动面所在土层的编号; γ_j 为第 j 层岩土体重力密度; h_{ji} 为土条 i 在第 j 层岩土体中的高度。

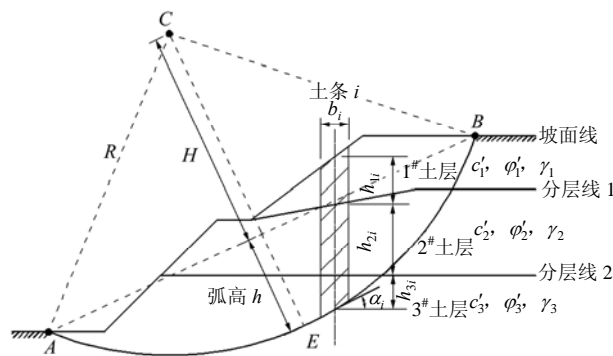


图 1 边坡稳定性分析模型及搜索变量选取

Fig.1 Slope stability analysis model and selection of search variables

3 搜索变量改进与优化模型

3.1 搜索变量的选取

本文改进搜索变量选取方式, 采用滑裂面与边坡面的左右交点 A, B 的 2 个横坐标(X_A, X_B)以及弧

高 h 作为搜索变量。取值范围不再需要经验假定，可以实现真正意义上的全面搜索。

3.2 搜索变量取值范围计算

(1) 弧高 h 最大值计算

对于高陡边坡，在搜索过程中容易出现如图 2 所示的不可行的滑动面情况，这样的滑动面是不符合实际的。对于本文来说就是求解弧高的最大值。

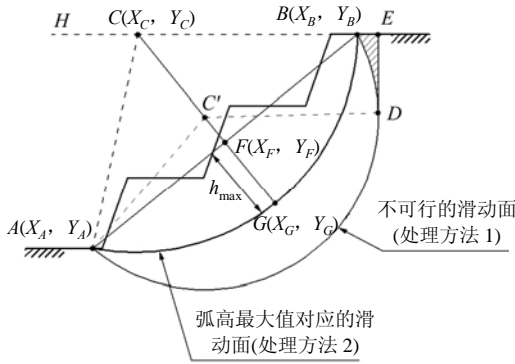


图 2 弧高最大值处理方法
Fig.2 Treatment method of the maximum of sagitta

现有软件的处理方法分 2 种：

① 过圆心 C 作水平线与滑弧交于点 D ，由点 D 作垂线，与坡面交于点 E ，得到区域 BED ，计算滑动体的重力时将区域 BED 重力计算在内，如图 2 所示。

② 增加约束条件 $Y_C \geq Y_B$ 。

本文采用第 2 种做法，具体做法如下：过点 B 作水平直线 BH ，作 AB 连线的中垂线，与 BH 交于点 C 。以点 C 做圆心，连线 CB 为半径，作圆。 CF 与圆弧交于点 G ， FG 即为弧高最大值。根据几何关系可推导得弧高的最大值为

$$h_{\max} = |FG| = R - \sqrt{(X_C - X_F)^2 + (Y_C - Y_F)^2} \quad (2)$$

式中： F 为线段 AB 中点。

(2) 弧高 h 最小值计算

若边坡形状较为复杂时，会出现滑动面与坡面相交的情况，称为“破弧”^[14~16]，如图 3 所示。一般程序将直线 AD 、 DE 、弧 EG 、直线 GH 、 HI 及弧 IB 作为滑动面，这样求出的安全系数是没有任何意义的^[14~16]。而弧 EG 或 IB 可能是最危险滑动面，导致最危险滑动面被遗漏。对于本文来说就是求解弧高的最小值。当坡脚点位于线段 AB 上方时，该坡脚点对应的弧高 h 最小值 $h_{\min} = 0$ 。当坡脚点位于弦线 AB 下方时，设共有 n 个点满足条件，坐标为 $E_i(X_{E_i}, Y_{E_i})$ ($i = 1, 2, \dots, n$)，图 4 中为点 E_1, E_2 。

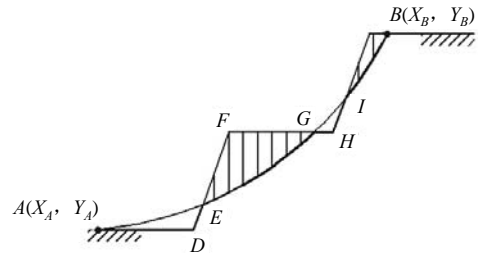


图 3 破弧示意图
Fig.3 Sketch of a broken arc

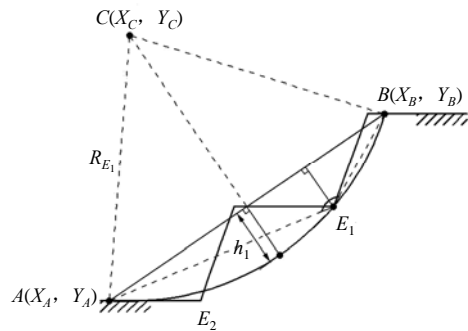


图 4 点 E_1 相应的最小弧高 h_1 推导示意图
Fig.4 Sketch of the minimum arc height h_1 at point E_1

根据余弦定理求 AE_i 与 E_iB 的夹角 β_i ，并利用正弦定理计算内接圆半径，即滑动面半径：

$$R_{\beta_i} = \frac{1}{2} \frac{AB}{\sin \beta_i} \quad (3)$$

其中，

$$\beta_i = \arccos \left(\frac{AE_i^2 + E_iB^2 - AB^2}{2AE_iE_iB} \right)$$

根据几何关系，可得对应的弧高：

$$h_i = \frac{2R_{\beta_i} - \sqrt{4R_{\beta_i}^2 - AB^2}}{2} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

以此类推，可得对于特定的滑动面与坡面左右交点 $A(X_A, Y_A)$ 和 $B(X_B, Y_B)$ 满足条件的最小弧高：

$$h_{\min} = \max\{h_i, i = 1, 2, \dots, n\} \quad (5)$$

若 $h_{\min} > h_{\max}$ ，说明对于交点 A, B 不能构成满足约束条件的滑动面，重新选择点 A, B 。

3.3 圆弧滑动面搜索的优化模型

采用简化 Bishop 法计算边坡安全系数，计算结果由滑弧的位置决定。根据节 3.2 推导，滑动面与坡面的左右交点的 2 个横坐标 X_A, X_B 和弧高 h 可以代替圆心坐标、半径作为搜索变量。

边坡滑动面搜索的数学模型可表示为

$$\left. \begin{aligned}
 &F_{s\min} = \min F_s(X_A, X_B, h) \\
 &X_A^u \leq X_A \leq X_A^l \\
 &X_B^u \leq X_B \leq X_B^l \\
 \text{s.t. } &h^u = f_1(X_A, X_B) \\
 &h^l = f_2(X_A, X_B) \\
 &h^u \leq h \leq h^l
 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $X_A^u, X_A^l, X_B^u, X_B^l, h^u, h^l$ 分别为变量 X_A, X_B, h 的取值范围, 且 h 取值范围由 X_A, X_B 确定。

4 边坡最危险滑动面联合搜索算法

4.1 分区间搜索策略

多级复杂边坡中存在多个危险滑弧, 一般软件只是求出最危险滑动面。工程实际中可能存在某些滑动面的安全系数与最小安全系数相差很小, 或虽比最小安全系数大, 但小于设定的安全系数, 而这些次滑动面的位置可能与最危险滑动面完全不同。这时如果只对最危险滑动面进行支护, 次危险滑动面仍可能发生滑动, 导致滑坡。

假设坡面线由 n 个节点组成, 从坡角左边开始编号, 共有 $n-1$ 条坡面线段。若滑弧右交点在第 i 条坡面线段, 滑弧左交点位于坡线 i 下的任一坡线上, 依次向下搜索, 可搜索到两坡线间的某个局部最小安全系数。可用数学模型表述为: 滑弧右交点 $X_B \in [X_i, X_{i+1}]$, 滑弧左交点 $X_A \in [X_j, X_{j+1}]$, 满足 $i > j$, 且 $i \leq n-1$, 共有 $(n-1)(n-2)/2$ 条滑弧。图 5 所示的坡面共有 7 个节点, 15 条局部滑动面, 图中只画出坡线 6 与其他坡线间的 5 条局部滑动面。

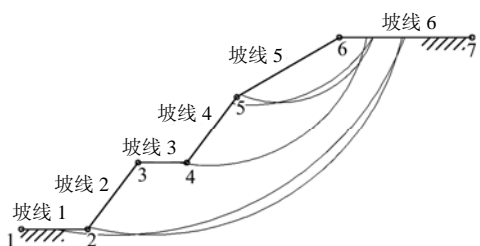


图 5 分区间搜索策略
Fig.5 Divided-interval search

采用分区间搜索策略可以找出边坡最危险滑动面和潜在滑动面, 实际应用中可根据计算结果对所有的潜在危险滑动面全面支护, 确保边坡稳定。

4.2 混沌优化算法

混沌是非线性系统中普遍存在的一种运动, 混沌看似混乱, 其实有着精致的内在结构。混沌运动具有遍历性、随机性、规律性等特点, 能在一定范围内按其自身的“规律”不重复地遍历所有状态^[7]。混沌运动的这些特点可以作为优化算法搜索过程中避免陷入局部极小值的一种机制^[8], 因此混沌优化作为一种新的算法, 受到了广泛的关注。但是混沌搜索局部搜索能力不强, 某些情况下计算时间较长。

本文的混沌优化只需搜索到一个大致接近于最优值的近似点, 以避免混沌优化算法在精细搜索过程中耗时过长的不足, 混沌搜索的步骤如下:

(1) 取 n 组有微小差异的初值 $\mathbf{y}^{(i)} = \{y_1^{(i)}, y_2^{(i)}, y_3^{(i)}\}^T$ ($0 < y^{(i)} < 1, i = 1, 2, \dots, n$), 按 Logistic 映射公式产生 n 组混沌变量^[7~9]:

$$v_{k+1} = \mu v_k (1 - y_k) \quad (7)$$

式中: μ 为控制参量, 当 $\mu = 4$ 时, 系统完全处于混沌状态。

(2) 设左滑出点区间 $X_A \in [a_1, b_1]$, 右滑出点区间 $X_B \in [a_2, b_2]$, 利用下式:

$$X_k^{(i)} = a_k + y_k^{(i)}(b_k - a_k) \quad (k = 1, 2; i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

将混沌变量映射到搜索变量 X_A, X_B 的取值范围上, 求得满足约束条件的 $X_1^{(i)}, X_2^{(i)}$, 即 X_A, X_B 。

弧高 h 范围可根据式(2)和(5), 求出对应的最大弧高 $h_{\max}[i]$ 和最小弧高 $h_{\min}[i]$, 类似式(8)将混沌变量映射到搜索变量 h 的取值范围上, 求得 $X_3^{(i)}$ 。记 $\mathbf{X}^{(i)} = \{X_1^{(i)}, X_2^{(i)}, X_3^{(i)}\}^T$, 计算相应安全系数 $F_s^{(i)}$ 。

(3) 若 $F_s^{(i)} < F_{s\min}$, 则 $F_{s\min} = F_s^{(i)}, \mathbf{X}_{\min} = \mathbf{X}^{(i)}$; 否则继续混沌搜索。

(4) 令 $k = k+1, \mathbf{y}^{(k)} = 4\mathbf{y}^{(k)}(1 - \mathbf{y}^{(k)})$; 直到经过一定步数, $F_{s\min}$ 保持不变, 算法停止。

4.3 改进复合形法

复合形法由 M. F. Box 于 1965 年提出, 基本思路是在 n 维设计空间的可行域内, 选择 k 个 ($n+1 < k < 2n$) 可行点构成多面体, 这个多面体称为复合形。复合形的每个顶点都代表一个设计方案。对各顶点的目标函数逐一计算比较, 取最大者为坏点, 不断去掉坏点, 代之以能使目标函数值下降又满足约束条件的新点, 如此重复, 复合形不断收缩, 逐渐逼近最优解^[10, 11]。

复合形法收敛速度快, 且不需要计算目标函数

的导数，但容易陷入局部极小值，也会出现迭代失败的现象，本文将混沌搜索引入复合形法中，充分利用混沌搜索全局优化和复合形法局部搜索收敛速度快的特点，有效地避免陷入局部最优。

本文对复合形的改进主要有 2 点：(1) 复合形法的计算结果对初始点较为敏感，利用混沌优化产生大致位于全局最优值邻域的较优点，使复合形陷入局部最优的概率大大减小，并能快速收敛到全局最小值；(2) 当映射失败时，利用混沌搜索引导复合形法跳出局部极小值。改进的复合形法搜索边坡最危险滑动面的步骤如下：

(1) 采用伪随机方法产生 6 个顶点即 6 组满足约束条件的初始值 $\mathbf{X}^{(i)} = \{X_A^{(i)}, X_B^{(i)}, h^{(i)}\}^T$ ($i = 1, 2, \dots, 6$)，生成方法与节 4.2 中步骤(2)类似，只是用 0~1 之间的伪随机数代替混沌变量。

(2) 计算相应的安全系数，并对产生的顶点分别进行 $M_1 = 100$ 次的混沌优化搜索，取最小值作为复合形搜索的初始点。

(3) 对 6 个初始点的安全系数排序，选出最坏点 $\mathbf{X}^{(H)}$ 即其安全系数最大。

(4) 计算除最坏点外其余的 5 个顶点的中心点 $\mathbf{X}^{(S)} = \frac{1}{5} \sum_{i=1, i \neq H}^6 \mathbf{X}^{(i)}$ 。利用下式求映射点 $\mathbf{X}^{(R)}$ ：

$$\mathbf{X}^{(R)} = \mathbf{X}^{(S)} + \alpha(\mathbf{X}^{(S)} - \mathbf{X}^{(H)}) \quad (9)$$

式中： α 为映射系数。

然后，判断映射点是否在可行域内，若满足继续计算，不满足则令次坏点为上限，最坏点位为下限，返回步骤(1)，直到满足约束为止。

(5) 计算映射点的安全系数，程序开始时令计数器 $g = 6$ ，若比最坏点的值小，则用映射点替代最坏点，构成新的复合形，完成一次迭代。若比最坏点的值大，将映射系数 α 减半即将 α 取 $\alpha/2$ 的值，重新计算映射点。如新的映射点满足条件，就替代最坏点，完成迭代；否则，将 α 减半，直到小于一个很小的正数 ζ 时，一般取 $\zeta = 1.0 \times 10^{-5}$ ，如果仍不能使映射点优于最坏点，可改用次坏点替换最坏点再行映射，令 $g = g - 1$ 。当 $g = 0$ ，就表示出现映射失败，可以认为复合形搜索陷入局部最小值。

对于复杂边坡有可能会出现最坏点映射失败，本文通过混沌优化搜索更新最坏点，避免复合形法陷入局部极值。映射失败时，最坏点作为初始值进行混沌优化搜索，直到搜索到比初始值更小的值，继续用复合形法搜索。

(6) 收敛判别。反复执行以上过程，直到满足下式：

$$\left\{ \frac{1}{6} \sum_i^6 [F_s(\mathbf{X}^{(i)}) - F_s(\mathbf{X}^{(c)})]^2 \right\}^{1/2} \leq \varepsilon \quad (10)$$

式中： $\mathbf{X}^{(c)}$ 为复合形中所有顶点的点集中心，即

$$\mathbf{X}^{(c)} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \mathbf{X}^{(i)}$$

此时复合形中最优值就是边坡最小安全系数，取 $\varepsilon = 1.0 \times 10^{-5}$ 。

4.4 分区间 - 混沌 - 复合形联合搜索算法

联合搜索算法首先根据坡面情况自动划分搜索搜索区间，缩小搜索尺度，有利于全局最优值的搜寻。然后采用混沌搜索改善初始点，此时初始点往往和最优值比较接近。再用复合形法进行优化，快速收敛于极小值，当迭代失败时，则利用混沌搜索脱离局部最优值；对于复合形法产生的结果，由混沌优化算法判断是否最优，若不是，继续循环迭代，其流程如图 6 所示。

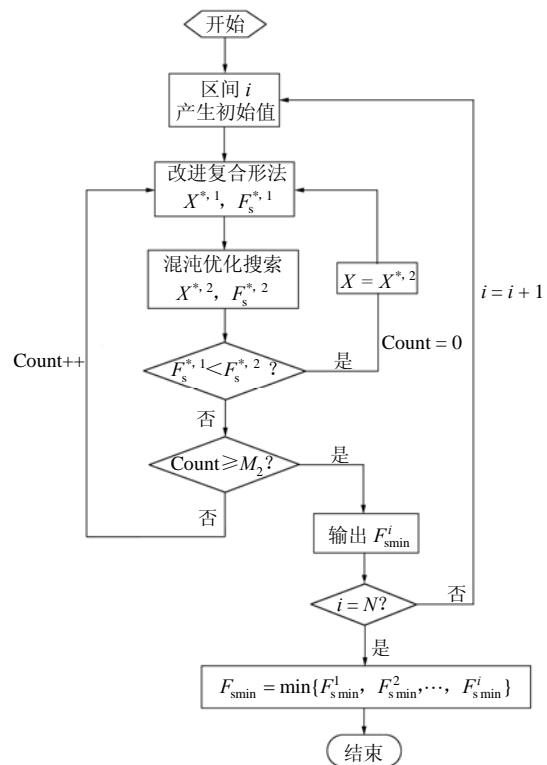


图 6 分区间 - 混沌 - 复合形联合搜索算法流程图
Fig.6 Flow chart of chaotic complex method based on divided-interval mixed search algorithm

具体步骤如下：

(1) 设有 N 个搜索区间，先令 $i = 1$ ，产生初始值。

(2) 用改进复合形法搜索出 $X^{*,1}$, $F_s^{*,1}$ 。

(3) 利用混沌全局搜索来检验改进复合形法是否陷入局部优值。以 $X^{*,1}$, $F_s^{*,1}$ 为初始点再进行混沌优化搜索, 若经过 $M_2 = 500$ 次搜索后, 仍没有找到比 $F_s^{*,1}$ 更小的值, 结束计算, 输出该区间的最小安全系数, 令 $i = i + 1$, 返回步骤(1), 搜索下一个区间, $i = i + 1$; 否则, 若找到 $X^{*,2}$, $F_s^{*,2}$, 满足 $F_s^{*,2} < F_s^{*,1}$, 将 $X^{*,2}$ 作为复合形的初始值之一, 返回步骤(2)。

(4) 若搜索完所有的区间, 即 $i = N$, 输出所有区间的局部最小安全系数, 同时取各区间计算结果的最小值作为边坡最小安全系数。

5 计算实例与分析

5.1 计算实例 1: 复杂边坡

海堤边坡^[6]剖面和各种算法的最终计算结果如图 7 所示, 坡比 1 : 3, 坡高为 6 m, 各土层材料物理力学参数见表 1。

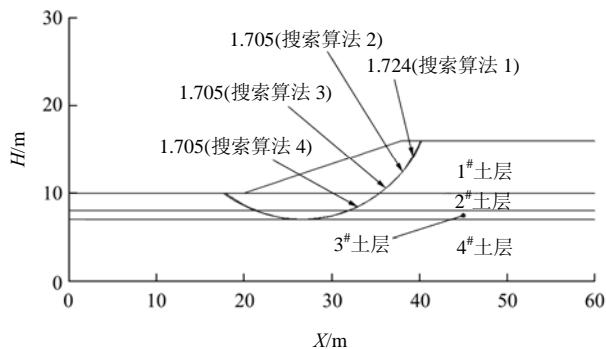


图 7 边坡剖面和各算法的最终计算结果^[6]

Fig.7 Cross-section of investigated slope and ultimate computation results obtained by different algorithms^[6]

表 1 各土层材料物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of different soil strata

土层编号	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
1#	0.0	35.0	19.22
2#	8.0	32.5	19.60
3#	10.5	0.0	18.50
4#	10.0	30.0	19.80

为说明改进搜索变量的优点, 还编写了以滑动面圆心坐标和半径为搜索变量, 基本复合形法为优化算法的边坡稳定性计算程序。传统搜索变量需要用户自行设定变量取值范围, 本文选用 3 组范围(坐标单位为 m): 域 1($X_C \in [0, 40]$, $Y_C \in [16, 30]$); 域

2($X_C \in [5, 60]$, $Y_C \in [16, 40]$), 域 3($X_C \in [0, 60]$, $Y_C \in [16, 40]$)。图 8 中只表示出域 2 各算法 50 次计算结果。

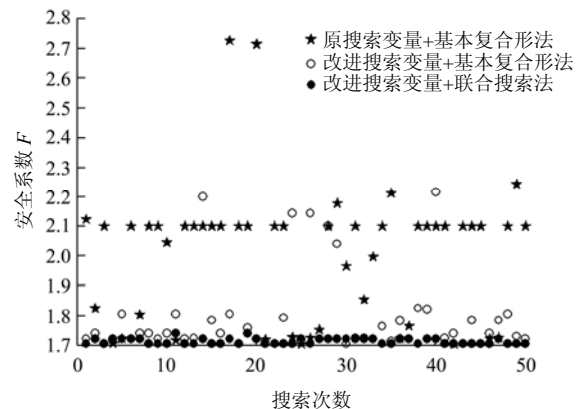


图 8 各算法 50 次计算结果

Fig.8 Computation results of different algorithms after calculation times of 50

采用李 亮等^[10]的定义, 第 i 组搜索到的最优值满足式(10), 则称寻优成功^[10]。 $F_{s\min}$ 为 50 组结果的最小值, ζ 为给定的误差阈值。

$$|F_{si} - F_{s\min}| / F_{s\min} < \zeta \quad (11)$$

寻优成功率=寻优成功的组数/50。为检验算法的正确性, 还采用理正边坡软件计算, 最小安全系数为 1.724(见图 7 和表 2)。以上 3 种算法经过 50 次运算后, 均能搜索到最小安全系数 $F_{s\min} = 1.705$ 。3 种算法和理正边坡所得到的最终滑动面位置极其接近, 具体位置参数列于表 2。本文所关心的是各阈值的寻优成功率, 这更能表征算法的性能。

表 2 不同算法 50 次运算后所得最小安全系数及相应最危险滑动面位置

Table 2 The minimum safety factors and the most dangerous slip surfaces obtained by different algorithms after calculation times of 50

搜索算法编号	搜索算法	$F_{s\min}$	R/m	X_C/m	Y_C/m
1	理正边坡软件	1.724	14.800 0	26.600 0	21.800 0
2	原搜索变量+基本复合形法	1.705	14.463 4	26.708 9	21.463 3
3	改进搜索变量+基本复合形法	1.705	14.462 0	26.708 0	21.462 0
4	改进搜索变量+联合搜索法	1.705	14.462 7	26.707 5	21.462 6

由图 8 和表 3 可知, X_C , Y_C , R 作为搜索变量时, 基本复合形法的计算结果较为分散, 约 70%集中于 2.1, 说明陷入了局部极小值, 而且不同取值范围也会对计算结果有较大影响。由表 4 可知, 采用改进搜索变量的基本复合形, 运算时间为采用传统

表 3 不同算法搜索寻优成功率比较

Table 3 Comparison of the minimum safety factors obtained by different algorithms

误差阈值 ζ	传统搜索变量(X_C, Y_C, R)			改进搜索变量(X_A, X_B, h)	
	基本复合形法			基本复合形法	联合搜索法
	域 1	域 2	域 3	寻优成功率/%	寻优成功率/%
0.01	8	14	2	38	92
0.03	20	24	18	60	100
0.05	26	28	20	72	100
0.07	28	28	22	86	100
0.10	30	32	22	88	100

表 4 不同算法单次运算时间比较

Table 4 Comparison of single computing time used for different algorithms

变量名称	算法类型	域编号	运算时间/s
传统搜索变量 (X_C, Y_C, R)	基本复合形法	1	0.136
		2	0.182
		3	0.121
改进搜索变量 (X_A, X_B, h)	基本复合形法		0.280
	联合搜索法		1.190

搜索变量的 2 倍, 但结果分布明显优于原搜索变量的基本复合形, 各阈值的寻优成功率高出 40%~60%, 主要落于 1.7~1.8, 而且用户不再需要凭经验设定变量取值范围, 不会遗漏可能的最危险滑动面。

以上基本复合形的分析说明本算例存在多个局部极小值, 算法很容易陷入其中。联合搜索法的运算时间为 1.190 s, 比基本复合形法耗时, 是因为混沌优化算法多次引导复合形法脱离局部极小值, 但远远少于一些商业软件所需时间。计算结果集中于 1.70~1.72, $\zeta = 0.01$ 时的寻优成功率为 92%, 50 组计算结果中最大值 $F_{s,max} = 1.741$ 与最小值 $F_{s,min} = 1.705$ 只相差 2.11%, 算法稳定性显著提高。

通过以上比较, 对于本算例, 可知联合搜索法的全局搜索能力较基本复合形法有大幅度的提高, 也说明改进的搜索变量选取方式优于传统的选取方式。

5.2 计算实例 2: 多级边坡

该多级边坡^[17]剖面及计算结果如图 9 所示。计算参数为: $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, $c = 5 \text{ kPa}$, $\varphi = 30^\circ$ 。

采用联合搜索法计算, 可得该边坡的最小安全系数为 1.337, 最危险滑动面位置见图 9(黑粗线)。

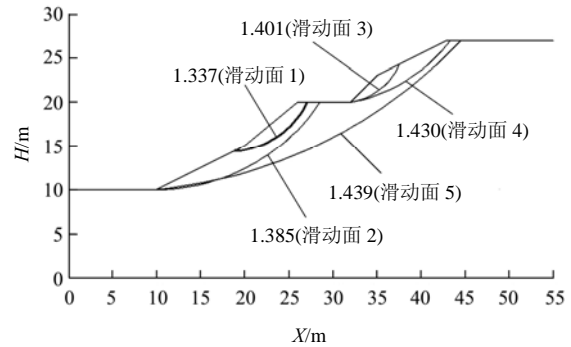


图 9 边坡剖面及计算结果^[17]

Fig.9 Slope section and computation results^[17]

根据分区间的搜索结果(见表 5, 滑动面参数用圆心坐标与半径表示), 在 1.38~1.44 间存在 4 个局部安全系数, 相应的滑动面位置如图 9 所示, 与最小安全系数仅相差 3.6%~7.6%, 但滑动面位置完全不同。对于本算例, 一般软件只能搜索到滑动面 1, 而忽略了潜在的危险滑动面。

表 5 最危险滑动面和潜在滑动面位置及其相应安全系数
Table 5 The most dangerous slip surfaces and the next critical slip surfaces and safety factors

滑动面 编号	滑动面所在横坐标区间/m		F_s	R/m	X_C/m	Y_C/m
	左滑出点	右滑出点				
1	[10, 20]	[26, 32]	1.337	9.841	18.252	24.264
2	[0, 10]	[26, 32]	1.385	22.128	9.994	32.128
3	[32, 35]	[35, 43]	1.401	7.285	30.846	27.193
4	[32, 35]	[43, 55]	1.430	18.352	28.646	38.043
5	[10, 20]	[43, 55]	1.439	54.508	4.725	64.252

6 结 论

本文针对复杂边坡的特点, 编写边坡稳定性计算程序, 采用分区搜索策略、混沌优化算法和复合形法联合搜索危险滑动面。

(1) 选用左、右出滑点和弧高控制滑动面, 提出了一种改进的搜索变量选取方式, 约束条件经过严密的数学推导, 变量取值范围不需经验假定, 可以真正实现全面搜索。

(2) 联合搜索算法充分利用混沌搜索全局优化和复合形局部搜索收敛速度快的特点, 克服混沌搜索的局部搜索能力不强和某些情况下耗时较长的不足, 并避免算法陷入局部最小值; 由于采用分区搜索策略, 算法自动完成多滑动面搜寻, 同时也将搜索区间分割, 缩小了搜索的尺度, 更有利于搜索

到全局最优解。

(3) 通过对复杂边坡算例的计算, 证明本文提出的改进搜索变量选取方式的优越性; 联合搜索法的优化效果和稳定性优于基本复合形法。本文提出的联合搜索算法在边坡稳定性分析方面是一种值得推广的优化方法。

(4) 多级边坡算例分析显示潜在滑动面的安全系数可能与最小安全系数相差很小, 而这些滑动面的位置可能与最危险滑动面完全不同, 说明在工程实际中寻找多滑动面的重要性。

参考文献(References):

- [1] WAN W, CAO P, FENG T. Improved genetic algorithm freely searching for dangerous slip surface of slope[J]. Journal of Central South University of Technology, 2005, 12(6): 749 - 752.
- [2] 阙金声, 陈剑平, 王清, 等. 遗传算法在土坡整体稳定性分析中的应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 415 - 419.(QUE Jinsheng, CHEN Jianping, WANG Qing, et al. Genetic algorithm applied to entire stability analysis of soil slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 415 - 419.(in Chinese))
- [3] 李守巨, 刘迎曦, 何翔, 等. 基于模拟退火算法的边坡最小安全系数全局搜索方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 236 - 240.(LI Shouju, LIU Yingxi, HE Xiang, et al. Global search algorithm of minimum safety factor for slope stability analysis based on annealing simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 236 - 240.(in Chinese))
- [4] 张浩, 王常明, 马文东. 边坡最危险滑动面全局搜索的模拟退火算法及改进[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(1): 129 - 133.(ZHANG Hao, WANG Changming, MA Wendong. Simulated annealing algorithm of global search for critical sliding surface of slope and improvements[J]. Journal of Jilin University(Earth Science), 2007, 37(1): 129 - 133.(in Chinese))
- [5] 陈云敏, 魏新江, 李育超. 边坡非圆弧临界滑动面的粒子群优化算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1 443 - 1 449.(CHEN Yunmin, WEI Xinjiang, LI Yuchao. Locating non-circular critical slip surfaces by partical swarm optimization algorithm[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1 443 - 1 449.(in Chinese))
- [6] 邹广电. 边坡稳定分析条分法的一个全局优化算法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 309 - 312.(ZOU Guangdian. A global optimization method of the slice method for slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 309 - 312.(in Chinese))
- [7] 李兵, 蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(4): 613 - 615.(LI Bing, JIANG Weisun. Chaos optimization method and its application[J]. Control Theory and Applications, 1997, 14(4): 613 - 615.(in Chinese))
- [8] 何春元, 梁伟, 张建勇. 改进的混沌优化算法及其在函数优化中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(3): 423 - 426.(HE Chunyuan, LIANG Wei, ZHANG Jianyong. Modified chaos optimization algorithm and its application in function optimization[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2008, 36(3): 423 - 426.(in Chinese))
- [9] 郑肇葆. 混沌映射在优化计算中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(11): 998 - 1 000.(ZHENG Zhaobao. Application of chaos mappings in optimization calculation[J]. Geomatics and Information Science of Wunan University, 2007, 32(11): 998 - 1 000. (in Chinese))
- [10] 李亮, 迟世春, 林皋. 改进复合形法及其在边坡稳定分析中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(10): 1 429 - 1 432.(LI Liang, CHI Shichun, LIN Gao. Modified complex method and its application to the slope stability analysis[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(10): 1 429 - 1 432.(in Chinese))
- [11] 李亮, 迟世春, 林皋. 一类新复合形法及其在临界滑动面搜索中的应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 448 - 452.(LI Liang, CHI Shichun, LIN Gao. A new kind of complex method and its application to the search for the critical failure surface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 448 - 452.(in Chinese))
- [12] ZHU D Y, LEE C F, JIANG H D. Generalized framework of limit equilibrium methods for slope stability analysis[J]. Geotechnique, 2003, 53(4): 377 - 395.
- [13] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析: 原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.(CHEN Zuyu. Stability analysis of soil slopes—theory, methods and programs[M]. Beijing: Chinese Water Power Press, 2003.(in Chinese))
- [14] 马忠政, 祁红卫, 侯学渊. 边坡稳定验算中全面搜索的一种新方法[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 256 - 259.(MA Zhongzheng, QI Hongwei, HOU Xueyuan. A new roundly search method for slope stability checking[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3): 256 - 259.(in Chinese))
- [15] 吕文杰, 朱合华, 李晓军. 边坡稳定分析的一种全面搜索方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增1): 4 456 - 4 459.(LU Wenjie, ZHU Hehua, LI Xiaojun. Global search method in slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Suup.1): 4 456 - 4 459.(in Chinese))
- [16] 吕文杰, 朱合华, 李晓军. 基于遗传算法的边坡稳定分析通用算法[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 595 - 599.(LU Wenjie, ZHU Hehua, LI Xiaojun. GA-based generalized slope stability analysis method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 595 - 599.(in Chinese))
- [17] CHENG Y M, LANSIVAARA T, WEI W B. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods[J]. Computers and Geotechnics, 2007, 34(3): 137 - 150.